

D-3 衛星可視域データのグローバルマッピングによる広域環境変動に関する研究

(2) 太平洋及び日本海中央部におけるクロロフィル分布とその変動機構に関する研究

研究代表者名 遠洋水産研究所	松村 皐月
水産庁 遠洋水産研究所	
企画連絡室	松村皐月
海洋・南大洋部 部長高緯度域海洋研究室	川崎 清*
	塩本 明弘
水産庁 日本海区水産研究所	
海洋環境部 海洋動態研究室	平井光行
	長田 宏
	山田東也
生物環境部	平川和正
	井口直樹
	西浜士郎
(委託先) 千葉大学 工学部情報工学科	安田 嘉純
(委託先) 東海大学 開発工学部	福島 甫

平成5-7年度合計予算額 77,253千円

(平成7年度予算額 26,410千円)

*：現在、水産庁中央水産研究所、海洋生産部、海洋動態研究室

[要旨]

太平洋親潮海域および日本海に於いてクロロフィル a 濃度を実測した。水色衛星データ (SeaWiFS、OCTS) によるクロロフィルグローバルマップ作成の為に、現場観測データは欠かせないからである。また、衛星データによるマップから、深度方向に分布するクロロフィルを量的に把握し、それをもとに海洋の富栄養化などの環境変動を見出すためには、クロロフィル-基礎生産力を中心とした物質フラックスの理解が必要となる。そこで、単にクロロフィル現存量と衛星データの付き合わせに終るのでなく、植物プランクトンのブルーミングから動物プランクトン等による捕食圧まで考慮した解析を試みたが、現時点では特定の関係を見出すことは出来なかった。

生物学的な検討に加えて、より正確な衛星画像を作成するための技術開発も行った。一つは大気補正手法の開発であり、一つは合成画像作成技術の開発である。前者においては、空間無相関法を用いてエアロゾルパラメータ ϵ を求める手法を開発し、412nm帯の大気補正をより確実なものにすることが出来た。後者では、数シーンの衛星画像を重ね合わせて特定海域の広域図を作成するために、作業迅速化のためのシステム整備と、雲識別アルゴリズム、異常データ処理アルゴリズムを開発した。

[キーワード] クロロフィル、水色衛星、グローバルマップ、コンポジット画像

1. 序

海洋における生物活動には様々なものがあるが、植物プランクトンによる光合成過程すなわち基礎生産はすべての海洋生物活動の源である。この基礎生産をより高次の生物たとえば魚類などにつなげる役割を果たすのが、動物プランクトンである。さらに、光合成は炭素循環における重要な一過程であり、地球環境をコントロールするうえで大きな役割を果たしている。そして、この重要な過程の担い手である植物プランクトンに大きな影響を及ぼす動物プランクトンもまた地球環境の変動に重要な役割を果たしているといえる。海洋レベルや地球レベルの環境を考えるにはこれら動・植物プランクトンをグローバルなスケールで捉らえることが不可欠である。このようなプランクトンの活動による海洋環境変動を広域にモニターする手法としては、衛星による水色観測に勝るものはない。そこで、アメリカの航空宇宙局（NASA）は水色衛星SeaWiFS打ち上げ準備中であり、日本の宇宙開発事業団（NASDA）は1996年にADEOS/OCTSを打ち上げる。これらの衛星センサーが提供するであろう可視域のデータを有効に利用し、動・植物プランクトンを主体とする環境モニタリング体制を築き上げるために、海洋観測等による植物プランクトンの現存量の指標であるクロロフィルを主体とした生物の動的研究所と、衛星画像作成技術の開発が必要となる。このような研究を進めて行くには、モデル海域を設定し観測を行う必要があり、海洋の大半を占める外洋域として北太平洋北部（親潮域）、陸からの人工物質の影響を強く受ける水域として日本海を選んだ。

2. 研究目的

人工衛星の可視域データ（水色データ）から求めたクロロフィルマップを有効に利用して、広域かつ長期にわたる海洋環境変動モニタリングシステムを構築することが本研究の目的である。水色画像から海洋におけるクロロフィル分布を把握するためには、まず水中や空中の光の観測から海洋中のクロロフィル分布を求めるために、水中、空中照度とクロロフィルとの関係を明らかにする必要がある。このため、船舶によるこれらの観測を行う。このような基礎データをもとにして、衛星画像から海洋のクロロフィル分布を得るために、大気補正や水中の有機物の影響の補正を行う。また、得られた衛星画像が正しいか否かの検証を行う。このため、実際の海洋におけるクロロフィルの分布やその時間変動はもちろん、海洋環境との関係を明らかにし、クロロフィルの動態を知る必要がある。さらに、クロロフィルは動物による摂食を受けた後の植物プランクトンの現存量であるため、必ずしも基礎生産力を反映していないので、現存量から物質の循環速度を求める場合にはクロロフィルから基礎生産力を求める手段が必要となる。このために、基礎生産力の実測や動物プランクトンの摂食速度の実測なども行い、クロロフィルの現存量と生産力との関係を解明する。

3. 研究方法

a) 衛星画像をもとにした植物プランクトンバイオマスの算定

水色センサーによるクロロフィル観測のために幾つかのアルゴリズムが提唱されている。それらは、数チャンネルの海面上向き分光輝度から、海面付近の実測クロロフィル濃度に合うように計算される。1978年にNASAにより打ち上げられたNIMBUS-7搭載のCZCS（水色センサー）では、クロロフィル色素濃度検出法として、波長の海面放射輝度 $Lu(\lambda_i)$ 、 $Lu(\lambda_j)$ の比 $R(ij)$ と色

素濃度が両対数グラフ上で直線関係になることが、応用された。通常は $\lambda_i=443\text{nm}$ 、 $\lambda_j=550\text{nm}$ が用いられている。前者はクロロフィル-aの吸収帯である。443nm帯はクロロフィル吸収帯のピークに近いので、ある程度クロロフィル濃度が高くなると、後方散乱光はゼロに近くなり、それ以上濃度が増えても変化しなくなる。そのため、高クロロフィル濃度域では $\lambda_i=520\text{nm}$ が用いられる。

図1は、各研究者によって得られた植物色素濃度と海面分光照度比の回帰直線 (Clark, 1981; Gordon et al., 1980,; Morel et al., 1978; Smith and Wilson, 1981; Smith and Baker, 1982; Sugihara et al., 1985) と、筆者等によって得られた日本周辺海域における値を示したものとクロロフィル色素濃度の関係である。どの結果も、両者の間に相関とクロロフィル色素濃度の関係が成立することを示している。これらの関係を用いて衛星観測値からクロロフィルマップを作成する。

しかし、この方法によって得られた値からクロロフィルバイオマスを計算するには大きな問題がある。植物プランクトンが生産層の深さまで均一な分布をしているのであれば、表面色素濃度は海域を代表するとみてよいが、一般的にはクロロフィル色素は深さ方向に均一な分布をしていない。色素濃度極大層が表面近くにある場合、 $Eu(\lambda_i)/Eu(\lambda_j)$ は正しく表層色素濃度を表わすが、そのまま水柱方向に積算すれば水柱植物プランクトン色素量の過大評価となる。一方、亜表層に色素濃度極大層がある場合は、極大層の深さによって、海面射出輝度 $L_w(\lambda)$ の値が異なってくる。日本周辺海域では、多くの場合、色素濃度極大層は、表層にはなく、亜表層(20m-50m深)にみられる。本報告が検討対象としている、本州東北・東海沖水域では、多くの場合、極大層は亜表層に見られる。一方親潮水域および沿岸水域では、表層に濃度極大層が多くみられる。

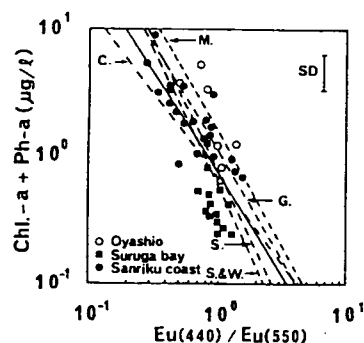


図1 海面上向き照度比 $E(440)/E(550)$ とクロロフィル色素濃度の関係。点線は欧米各研究者の得た回帰直線。点は日本近海データによる。実線はその回帰直線。

クロロフィル色素濃度の鉛直分布から定性的な特徴を読み取ることはできるが、大量のデータを体系化するためには、この鉛直分布を一定のモデルで表現するのが良い。分布形態のモデル化により、各種観測フォーマットで格納されている色素濃度鉛直分布データを、一元的に処理できるよう整理し直すことができる。また、単位水柱当たりの植物プランクトン色素量を計算することも容易になり、色素濃度の分布から消散係数を求め、水中 PAR が推定できる等、利点は多い。鉛直分布の基本形態として、ガウス分布に鉛直勾配を加えたものとしたモデルを開発した。

PLATT (1988) が開発した方法に改良を加え、色素濃度の鉛直分布パターンが、中層に極大値を持つ単峰型分布をとりつつ、表層と下層では異なる色素濃度であるとした。その分布型はガウス

分布に鉛直勾配を加えたものであると定義し（図2）、次式で与えた。

深度Zにおける植物プランクトン色素濃度C(z)は

$$C(Z) = C_0 + S \cdot Z \frac{h}{\sigma \sqrt{2}} \exp\left[-\frac{(Z-Z_m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad \dots\dots (1)$$

ここで、

C₀ : 表層の植物プランクトン色素濃度(μg/l); Z_mが表層に近い場合、
 仮想の値となる。その場合、表層値は C(0) として得られる。

S : 植物プランクトン色素濃度鉛直勾配(μg/l/m)

Z_m : 植物プランクトン色素最大濃度の深度(m); 最大濃度が表面に
 ある場合 Z_m ≤ 0 となる。

h : 極大層に存在する植物プランクトン色素量 mg/m²

h/σ√2π : 中層植物プランクトン色素濃度極大値

σ : 極大層標準偏差; 極大層の厚さのパラメーター: 4σが層厚

そして水柱植物プランクトン色素量 T_{chl}は

$$T_{chl} \text{ (mg/m}^2\text{)} = \int C(z) dz \quad \dots\dots (2)$$

となる。ここにE_Zは植物プランクトン色素分布限界深度であるが、基礎生産力を考える場合、補償深度迄計算すればよいものであるとし、実際には、100mまでを計算対象とした。

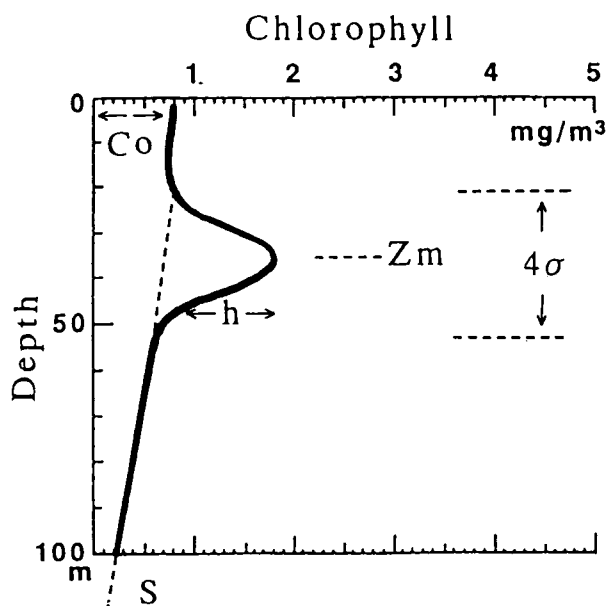


図2 クロロフィル色素鉛直分布モデル

b) 太平洋と日本海中央部におけるクロロフィル分布等

北太平洋亜寒帯域の西側に位置する水域に観測点を設けて、1993-1995年までの5-6月において観測を行った(図3)。各定点ではCTDにより水温、塩分を測定するとともに、クロロフィルa濃度や栄養塩濃度についても実測した。

日本海中央部においては、大和礁とその周辺において、1993-1995年の3年間にわたって、毎年、春季(4月)、夏季(8-9月)、秋季(9-11月)の3回、海洋観測を実施した(図4)。各定点ではCTDにより水温、塩分を測定するとともに、クロロフィルaについては、現場型水中蛍光光度計(クロロテック)を用いて、表面から150mまでの鉛直的な連続記録を得た。さらに、代表的な植食性動物プランクトンであるツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* (未成体・成体)に珪藻 *Chaetoceros sociale* を餌料としてさまざまな濃度で与え、水温10°Cでの摂食速度を測定し、日間食量を算出した。

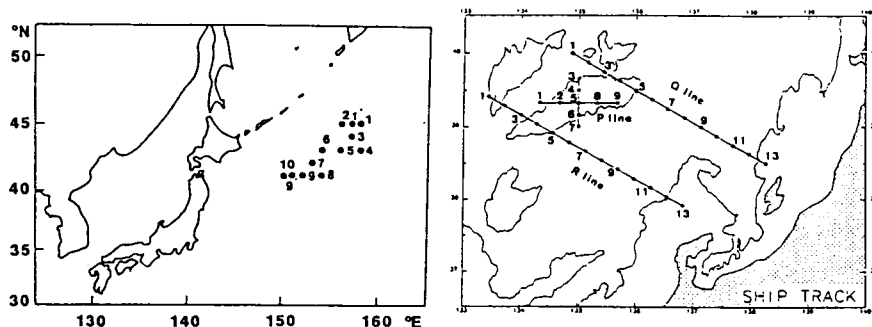


図3 北太平洋亜寒帯域と日本海中央部における観測点の位置

c) SeaWiFSデータ処理システムの開発とコンポジット画像作成技術

複合画像作成処理の高速化にあたって、より高速な計算機への処理プログラムの移植、sin、cosのルックアップテーブル化、散乱位相関数のルックアップテーブル化などを行った。また、目視に頼っていたクオリティチェックの自動化を行った。

複合画像は、ある期間内のいくつかのシーンをまとめて平均化処理を行い、その期間内の平均場を1枚の画像にしたものである。平均化を行う上で、より多くのデータを使って平均を行うことによって、データの精度が上がる。その一方で、ただ単にデータを増やすだけではなく、平均を行う際に使用するデータにノイズが混入しないようにしなければならない。平均処理に使用するデータ数を増やすための処理方法、様々な原因によるノイズの除去方法、そして大気補正の精度を上げるために1画素毎にオゾン濃度と大気圧を考慮した大気補正方法について検討した。

さらに、ノイズの画素のマスキング処理としては、原画像に含まれるのノイズのマスキング処理、雲識別手法の改善、雲近傍のマスキング処理、画像両端で生じる異常値とマスキング処理の4つの点について検討した。

d) SeaWiFSの新波長による生物環境パラメータ算出手法

短波長バンド(412nm)を用いた溶存有機物(DOM)を推定するためのアルゴリズムについて、待機効果補正で問題となるエアロゾルの波長依存性や、アルゴリズム検証用海域の検討を含めて検討した。実際には、日本周辺のCZCSデータの解析、および、エアロゾルの粒径分布の測定(千葉市および新潟市)等を行い、日本周辺海域の大気エアロゾルパラメータの波長依存性につ

て調べた。また、クロロフィル色素濃度の月変動パターンの相違をもとに日本近海の海域分割を試みた。

4. 結果と考察

a) 衛星画像をもとにした植物プランクトンバイオマスの算定

亜熱帯水域において色素濃度極大層が100m前後にある時は、状況に応じてEzを150m前後迄延長した。図4にクロロフィル実測値とモデル適合曲線の一例を示す。日本近海約1000サンプルについて検証した結果モデル適合率は86%であり、赤道海域90点では93%の適合率を得た。

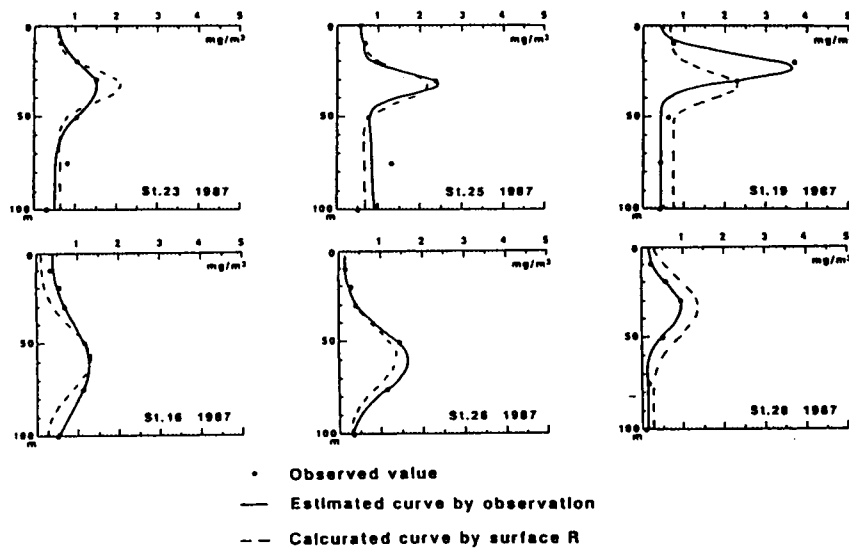


図4 モデルと実測値の関係例

表1に、パラメーターを一例として示す。各パラメーターが、鉛直分布図形の特徴を良く表わしていることが理解できる。

表の第7列にある T_{chl} (mg/m^2) は式(2)より求めたものであり、 h は極大層に存在する植物プランクトン色素量 (mg/m^2) である。水柱植物プランクトン色素量 T_{chl} に対する、極大部分に存在する植物プランクトン色素量の割合は、約0.3-0.6程度と比較的高いところにあり、単位面積当たりの総色素量を考えるためには、極大層の存在を無視できないことを示している。極大層の厚さは表面光情報として顕著には表われないことから、リモートセンシングデータのみからは直接その算定をすることは困難である。従って鉛直分布パターンは、過去のデータベースから得た知見より、水域別・季節別に求めて、パラメーター化することが必要となる。

モデル解析より、海域と季節の特徴を得れば鉛直分布のパターンを求められる事が分かった。海域分類は表面水温を用いれば可能であり、それにより亜表層極大深度が規定出来る。表層クロロフィル濃度と亜表層濃度極大値との間にも比例関係がある事から、衛星により海面水温と海面クロロフィル濃度が得られれば、衛星画像からクロロフィル濃度の3次元解析が出来る事になる。それによりバイオマスの時系列解析も可能になる。1996年夏に打ち上げが期待されているADEOS/OCTSのデータが入り次第、次のステップに着手出来る。

表1 クロロフィル濃度鉛直分布係数の一例。第7列は水柱クロロフィル色素量、第8列はその内の中層極大層に存在するクロロフィル色素量

Stn	Chl. a (µg/l)		Chl. a (µg/l)		Total Chl. a (µg/l)	Chl. a (µg/l)
	Surface	Deep	Surface	Deep		
14	0.26	76	1.04	0.002	52.9	76.71
15	0.41	52	1.09	0.002	7.9	53.67
16	0.69	43	1.32	0.004	66.6	63.66
18	0.55	39	2.09	0.004	56.3	52.66
19	0.42	23	2.04	0.005	27.4	29.17
21	0.66	33	2.04	0.005	29.6	30.47
22	0.79	26	2.04	0.005	24.9	26.15
23	0.54	35	1.52	0.005	52.2	46.30
24	0.64	29	2.04	0.005	16.7	21.54
25	0.59	22	2.26	0.002	22.2	20.24
26	0.66	69	1.56	0.004	64.9	66.44
27	0.25	25	0.30	0.004	49.4	29.14
28	0.17	34	0.36	0.005	47.8	41.19
29	0.26	34	1.50	0.004	162.2	62.24
30	0.19	26	1.43	0.004	45.3	54.22
31	0.26	56	0.96	0.005	49.3	56.00
33	0.69	54	0.99	0.004	162.5	79.23
34	0.21	43	1.46	0.004	117.9	73.36
35	0.62	43	1.24	0.002	67.5	62.47
47	0.33	66	1.15	0.005	66.1	66.33
48	0.26	54	2.26	0.002	49.8	54.36
49	0.21	52	1.22	0.004	51.4	49.24
50	0.17	56	1.56	0.004	64.9	75.01
51	0.14	56	1.72	0.005	54.4	69.30
54	0.16	51	1.26	0.005	49.2	44.94
55	0.22	52	0.64	0.005	44.4	43.30
57	0.16	35	2.02	0.004	26.3	27.19

b) 太平洋および日本海中央部におけるクロロフィル分布等

1993年、1994年ならびに1995年におけるクロロフィル a の鉛直分布を図5に示す。1993年においては、5月20日に観測されたSta.10の表層20m以浅で8-10 $\mu\text{g/l}$ という著しく高い値がみられた。Sta.10の表層においてみられた高い値は、北海道噴火湾におけるブルーミング時の最大値である約10 $\mu\text{g/l}$ という値（西浜,1982）に匹敵した。1994年においては、6月1日に観測されたSta.3と6月4日に観測されたSta.6の30m以浅で2-3 $\mu\text{g/l}$ 程度であった。Sta.3とSta.6で観測された比較的高い値は、道東沖における春季ブルーミング時の最大値である約5 $\mu\text{g/l}$ という値（荻島,1991）の40-60%に匹敵した。1995年においては、6月2日に観測されたSta.3の10m以浅で2.5 $\mu\text{g/l}$ 程度の比較的高い値がみられ、5月31日に観測されたSta.1'-1や6月1日に観測されたSta.1'-2でも20m以浅で1.5 $\mu\text{g/l}$ 程度の値がみられた。Sta.1'-1、Sta.1'-2やSta.3、で観測された比較的高い値は、道東沖における春季ブルーミング時の最大値である約5 $\mu\text{g/l}$ という値の30-50%に匹敵した。3ケ年における観測から、外洋域の親潮においてもクロロフィル a 濃度でみて、沿岸域や沖合域に匹敵する規模の春季ブルーミングが観測された。

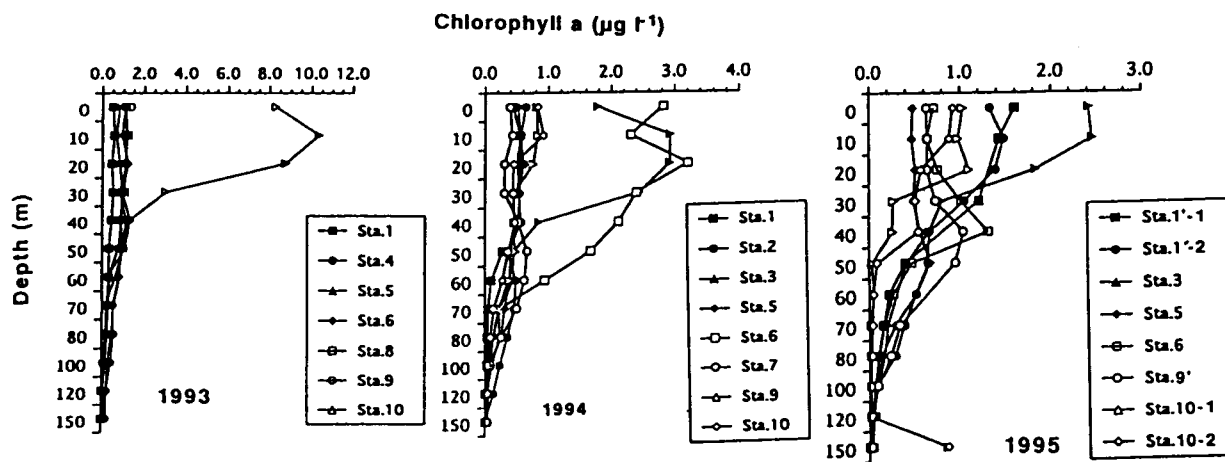


図5 1993年、1994年ならびに1995年の春季（5-6月）における150m以浅のクロロフィル a 濃度の鉛直分布。

1993年、1994年ならびに1995年における水温、塩分の鉛直分布を図6に示す。1993年において、春季ブルーミングが起っていたSta.10における表層の水温は3-6°C、塩分は33.0-33.2であった。ブルーミングが起っていた表層の水は親潮系水（塩分33.4以下）（大谷,1971;Kawai,1972）であった。密度躍層が10-20mにみられ、高いクロロフィルa濃度は主に密度躍層よりも浅いところにみられた。また、有光層の深さは密度躍層の深さよりも幾分浅いところに見られた。1994年においても、ブルーミングが起っていた表層の水は親潮系水であった。密度躍層はSta.3では50mあたりに、Sta.6では10-20mにみられ、高いクロロフィルa濃度は密度躍層よりも浅いところにみられた。また、有光層の深さは、Sta.3では密度躍層の深さよりもかなり浅いところに、これに対してSta.6ではほぼ同じ深さにみられた。Sta.3の観測当日は回復していたが、前日は低気圧が来ていた。図6に示した結果はSta.3における早朝での観測の結果であるので、前日の時化の影響があったのかもしれない。ただし、Sta.3における時間後、10時間後の観測では有光層とほぼ同じ深さの10mあたりに緩やかな密度躍層がみられた。1995年においても、ブルーミングが起っていた表層の水は親潮系水であった。密度躍層はSta.1'-1では30-40mに、Sta.1'-2では40mに、Sta.3では20-30mにみられ、クロロフィルaで、高い値は密度躍層以浅にみられた。有光層の深さは、密度躍層の深さとほぼ同じであった。

以上の結果より、春季ブルーミングが起っていた観測点では密度躍層すなわち混合層の深さは有光層の深さとだいたい同じであった。また、ここでは示さなかったが、親潮系水が表層を占めていたがブルーミングが起っていなかった観測点では、混合層の深さは有光層の深さよりも深かった。したがって、北太平洋亜寒帯域の西側において春季ブルーミングの発現には水柱の安定性が重要な役割を果たしている、と考えられる。

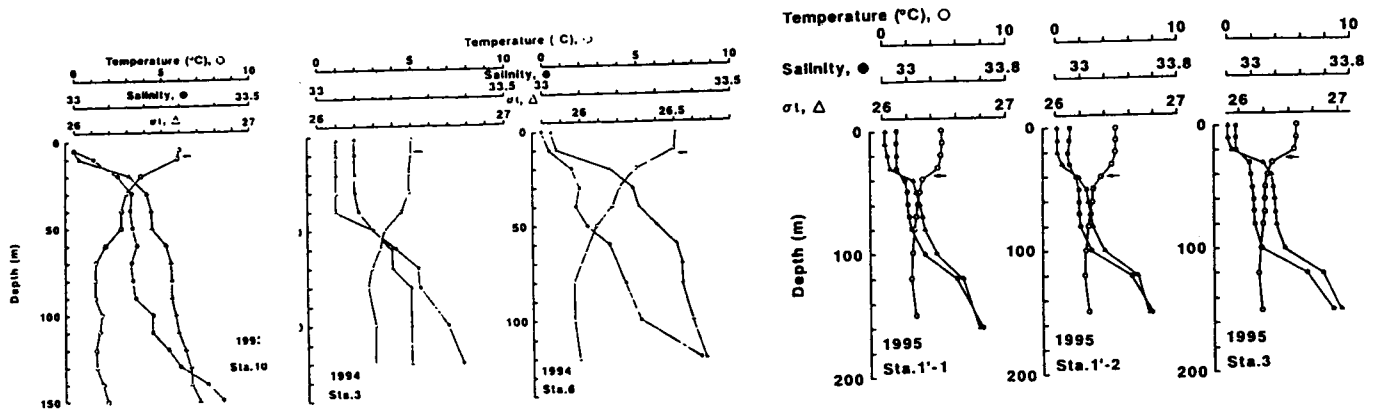


図6 1993年、1994年ならびに1995年の春季ブルーミングが起こっていた観測点（1993年においてはSta.10、1994年においてはSta.3と6、1995年においてはSta.1'-1、1'-2、3）における水温、塩分および σ_t の鉛直分布。矢印は有光層の深さ（1%光深度）を示す。

次に、各々の栄養塩が春季ブルーミングにおいてどのような役割を果たしているかについて考察を加えた。まず、50m以浅の親潮系水中のケイ酸塩と窒素態栄養塩との関係を見ると、両者にはよい直線関係が認められた（図7）。この結果は、ブルーミングが進行し、この直線の勾配（1:1.8）で窒素態栄養塩とケイ酸塩とが植物プランクトンに取り込まれて行けば、低濃度のところのデータはないが、切片が負であるので、先にケイ酸塩が無くなり、窒素態栄養塩

が残ることを意味している。次に、窒素態栄養塩とリン酸塩との間にもよい直線関係が認められた（図7）。両栄養塩が1:0.05で取り込まれていけば、切片が正なので、先に窒素態栄養塩が無くなり、リン酸が残ることとなる。

以上の結果から、北太平洋の亜寒帯域の西側における春季ブルーミングではケイ酸塩が最初に無くなる栄養塩であるかもしれない。すなわち、ケイ酸塩は春季ブルーミングの制限要因のひとつとなっているかもしれない。

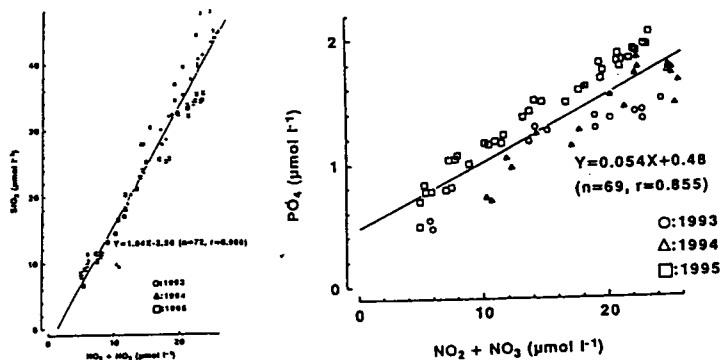


図7 1993-1995年における50m以浅の親潮系水（塩分33.4以下）の亜硝酸塩+硝酸塩とケイ酸塩、亜硝酸塩+硝酸塩とリン酸塩との関係。回帰直線は最小自乗法により求められた。

日本海中央部における表面のクロロフィルa量の変動をみると、春季に高濃度を示した後、夏季に著しく低下し、秋季にやや増大する傾向がうかがえる（表2）。平均値、標準偏差ともに、年変動は比較的小さいことから、このような季節変動が毎年繰り返されていると考えられる。衛星による水色画像は、表面のクロロフィルa量の情報を最も多く含むと考えられるので、これらの観測結果から、日本海中央部では、衛星による水色画像に表面の植物プランクトン現存量の季節変動の特徴が明瞭に現れることが予想される。

表2 日本海中央部の表面のクロロフィルa濃度（mg/m³）

	Spring	Summer	Autumn
1993 Range	No data	0.09-0.27	0.10-0.28
Mean±SD	No data	0.13±0.05	0.15±0.05
1994 Range	0.92-3.12	0.06-0.21	0.15-0.49
Mean±SD	1.62±0.62	0.14±0.04	0.30±0.07
1995 Range	1.03-2.57	0.12-0.32	0.27-0.68
Mean±SD	1.67±0.40	0.19±0.06	0.47-0.12

表3 日本海中央部の表面の水温とクロロフィルa濃度との相関関係

	Spring	Summer	Autumn
1993	No data	-0.52*	-0.14
1994	0.38	0.13	0.09
1995	-0.52	-0.43	-0.08

* p<0.05

表面のクロロフィルaの水平分布を、表面水温のそれと関連づけて調べるために、両者の相関関係を検討したが、有意な相関係数が得られたのは1993年の夏季のみであり、他の年、季節については相関関係は認められなかった（表3）。一方、100m水温で6°Cを基準として日本海の冷水域と暖水域とを区分し（谷岡,1962）、冷・暖水の分布と表面のクロロフィルa量との関係を調べたところ、1994年の春季には冷・暖水の前線域および南部の暖水域では、北部の冷水域よりもクロロフィルa量が多い傾向はみられたものの、他の年、季節については、明瞭な対応関係は認められなかった（長田ら,1996）。

表4 1994年日本海中央部の亜表層のクロロフィル極大（SCM）の深度、クロロフィル極大の濃度および水柱への寄与率。数字は平均値±SD。

	Spring	Summer	Autumn
Depth of SCM (m)	22.6±10.5	48.1±10.9	38.0±5.7
Maximum chl.a (mg/m ³)	2.18±0.67	0.95±0.24	1.20±0.41
SCM%* (%)	16.9±3.0	24.2±4.4	28.1±4.6

* Percentage of integrated chl.a in the maximum±5m column to that in 0-100m column.

次にクロロフィルaの鉛直分布の特徴を明らかにするため、最も多くの定点を観測することができた1994年について、クロロフィルaの極大層の深度、極大層におけるクロロフィルa量、および極大層の発達指標として、表面から100mまでのクロロフィルa積算量に対する、極大層を中心とした±5m層中のクロロフィルa量の割合を整理した結果を、季節ごとに表4に示す。クロロフィルaの鉛直分布の特徴として、①極大層は3季節ともに存在するが、その深度は春季から夏季にかけて深くなり、秋季にはやや浅くなる、②極大層におけるクロロフィルa量は、夏、秋季は春季の半分程度であるが、夏、秋季は春季に比べて極大層が発達している、という点をあげることができる。水色リモートセンシングで把握できるのは、透明度の1/2強の水深までとされており（水産電子協会,1995）、日本海中央部の透明度が、春、夏、秋季はそれぞれ10~20m、18~22m、20~22mである4)ことを考えると、極大層におけるクロロフィルa量、ひいては水柱全体のクロロフィルa量は、水色画像には直接反映されないことになる。従って水色画像から水柱全体のクロロフィルa量を推定できるか否かを検討するには、さらに現場データを蓄積して、表面のクロロフィルa量と水柱全体のそれとの相関関係を明らかにする必要がある。

植物プランクトンは常に動物プランクトン等による摂食を受けているため、クロロフィルaの現存量は、そのまま基礎生産量の多寡を反映しているとは限らない。そこで1994~1995年に現場調査と飼育実験を並行して行うことによって、日本海における代表的な植食者であるツノナシオキアミの摂食圧を調べた。その結果、最大日間摂食量は、夏季には春、秋季の約2倍（375μgC/ind./day）に増大することが明らかになった（図8）。このことは、植物プランクトンに対する植食性動物プランクトンの摂食圧は季節によって異なることを示しているが、特に夏季におけるクロロフィルaの分布に大きな影響を与えていると考えられる。

水色観測衛星の打ち上げが、当初の計画より遅れたために、得られた観測結果を直接、水色画像の検証データとして利用することができなかった。しかし、①3年間にわたる日本海中部海域の現場観測によって、表面のクロロフィルa量は、春季には高く、夏季には著しく減少し、その後秋季にはやや増大するという季節変動を示すものの、②冷・暖水域との対応関係は不明瞭であることが明らかになった。一方、③春～秋季には20～50mの深度にクロロフィルaの極大層が発達すること、④夏季にはツノナシオキアミの摂食量が増大し、クロロフィルaの現存量に影響を与えている可能性のあることがわかった。これらの結果は、水色画像を用いてクロロフィルaの現存量を推定する場合には、海洋観測によって表面のクロロフィルa量と水柱全体のそれとの相関を明らかにするとともに、基礎生産量まで推定する場合には、植食性動物プランクトンによる摂食圧の大きさも調べる必要があることを示している。

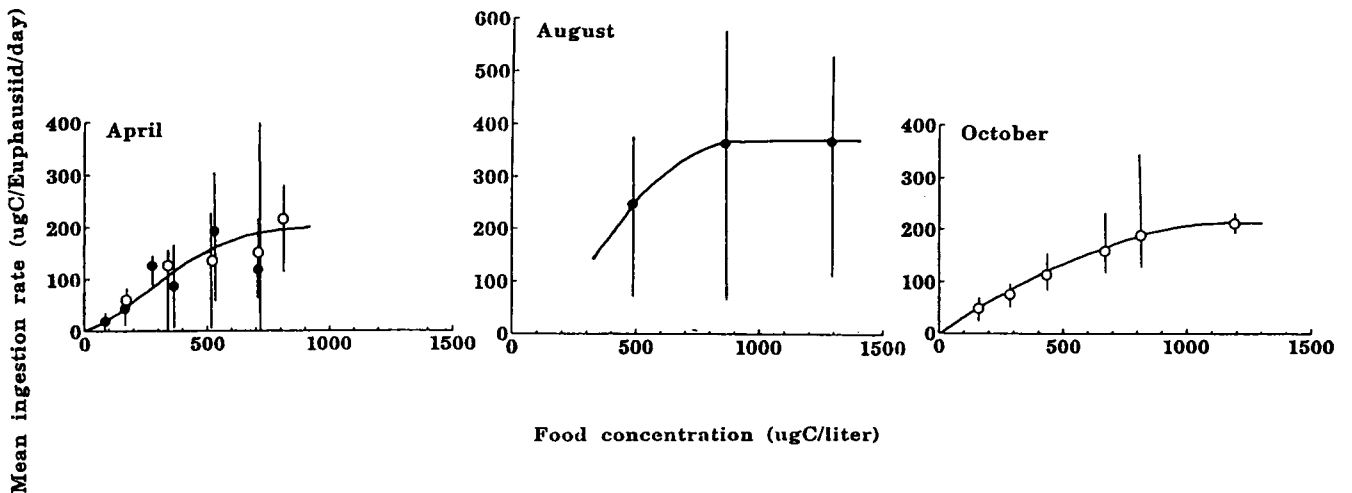


図8 ツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* の珪藻類への平均摂食速度。●：1994, ○：1995。

c) SeaWiFSデータ処理システムの開発とコンポジット画像作成技術

SS2よりも高速な計算機への移植として、平成6年度には、Silicon Graphics Indigo (Silicon Graphics社製、以下SGIと略)へ、平成7年度にはsparc station 20 (SUN社製、以下SS20)への大気補正プログラムの移植を試みた。その結果、1シーンの処理時間は、SGIでは約20分となり、10分程度の高速度化が得られた。また、SS20の場合には、およそ8分となり、SGIに比べてさらに12分程度高速度化が得られた。このように、より高速な計算機にプログラムを移植することによって、計算時間は当初の約40分から8分とおおよそ5倍ほど短縮された。

次にsin、cos関数を計算する際の処理時間の短縮を試みた。普通sinとcosの計算は、計算機に組み込まれた関数を使うが、sin、cos関数は比較的計算時間のかかる関数であり、出来るだけこの関数を呼ばないことが望ましい。そこで、これらの関数の値をある刻み幅で計算して表(実際にはメモリ上に記憶された配列)を作成し、これを参照してsin、cos関数の値を計算する方法(Table look-up)を考えた。刻み幅を精度の面から検討した結果、0.1度刻みで十分であることがわかった。よって、sin、cos関数の計算は、Table look-upを使い、0.1度刻みで計算することとした。これによって1シーンあたり1分30秒程度処理時間が短縮された。

散乱位相関数についてもsin、cosと同様にTable look-upを使うこととした。エアロソル散乱位相関数のテーブル化についてその方式とサイズを検討した結果を、次に示す。精度に関しては、

散乱角(θ)見出しのテーブルの方が $\cos\theta$ 見出しのテーブルに比べて1/10~1/40誤差が小さいことが確認された。また、最大誤差は θ が0.05度刻みのテーブルで0~180度の範囲では0.0029%、90~180度に限れば0.00021%と非常に低く、散乱位相関数のテーブルは0.05度刻みのテーブルで十分であることが確かめられた。また、大気補正処理における散乱位相関数のテーブル化によって、TTHG関数をそのまま計算することに比べて最大(8%)の高速化が得られた。

従来は、1シーン毎に目視によってクオリティチェックを行い、データの取り捨て選択を行ってきた。このことは、評価者がすべてのシーンを1つ1つチェックすることを意味し、かなりの時間を要する。これを解決するには、何らかの客観的な基準を設けて人手を介さずに自動的にクオリティチェックをすることが必要であり、処理を高速化する上で必須の課題である。1画素毎の自動クオリティチェックは、処理の高速化のみならず有効画素数を増やしデータ処理の高精度化のためにも必要である。内容が重複するため、クオリティチェックの方法およびマスク処理の詳しい内容については次の節で述べる。

従来は、1シーン毎に目視によってクオリティチェックを行い、データの取り捨て選択を行ってきた。このことは、データを取り捨て選択するにあたって十分な知識を持った評価者を必要とすること、評価者の主観に左右されるきらいがあること、大量のデータ処理には向かないこと、1シーン毎に取り捨て選択をするために捨てるシーンの中には問題のないピクセルも含まれておりデータを有効に使うことができないこと、を意味していた。これらの問題を解決するには、何らかの客観的な基準を設けて人手を介さずに自動的にクオリティチェックをすることが必要である。このとき、取り捨て選択する単位は、1シーン毎ではなく、1ピクセル毎にクオリティチェックを行うこととした。客観的な基準として、Gordonら(1993)の水中の光学モデル計算と船舶による観測から海水射出放射輝度に関する知見から、正規化海水射出放射輝度の最低値を利用した。その結果、人の判断によって問題とされた画素、植物プランクトン色素濃度の異常な高濃度海域のほとんどを自動的にマスクできることがわかった。このことから、正規化海水射出放射輝度の最低値という閾値を設けて、自動的にクオリティチェックを行うことが非常に有効であることがわかった。このように1シーン毎の取捨選択が1画素毎に変わったことにより、有効画素数が増えた。また、自動処理により客観性が増したことにより処理の精度が向上した。さらに自動化を行うことにより処理がより高速になり、大量データ処理も可能となった。

CZCS原画像の解像度は、およそ1km×1kmである。それに対し、今回の北西太平洋の複合画像の解像度は4km×4kmである。1km×1kmのデータを4km×4kmにマッピングすると16ピクセルが、複合画像1ピクセルに対応する。本委託研究がスタートする前は、処理時間の関係で原画像を3間引きし、3km×3km解像度で処理を行い、そのまま幾何補正をしていた。間引きすることによりデータ量は9分の1、また幾何補正時には上書きが行われ、有効画素数の減少をもたらしていた。そこで、平成6年度は、大気補正の高速化を行い、間引きなしで処理するとともにbinデータとして蓄積する処理方法を採用し、有効画素数が減少しないように改善を行った。その結果、幾何補正処理の際に、同一binに入るデータを蓄え、それらを使って平均化処理を行うように処理を改善した。3間引きから間引きなしに、そしてbinning処理を行うことにより、有効画素数は従来のものに比べて、1binあたり10倍程度増加した。

CZCSの原画像には、衛星データの受信、保存時に混入したと考えられるノイズが存在する。このノイズの特徴は、衛星のスキャン方向に現れること、回りのピクセルのカウント値に比べて明

らかに低い値を持つことである。その多くはカウント値が0であり、容易に判別が可能である。ノイズが現れるピクセルは、チャンネルによってことなるため、1から4までのチャンネルのいずれか1つにノイズがあれば、そのピクセルがマスクし、大気補正処理の対象から外すこととした。カウント値が0以外のノイズに関しては、ピクセル周辺のカウント値との比較を行い、ある閾値以上の差がある場合（周囲の平均値に比べて6カウント以上異なる場合）にはノイズと判別することとし、その画素をマスクした。

雲識別手法としては、「正規化エアロソル散乱光輝度」の閾値によるCZCSデータに適用した例を紹介するとともに、そのパラメータの適正值についても検討した（平成5年度）。その結果、正規化エアロソル散乱光輝度の適切な閾値については、CZCSデータで検討した結果、 $nLA(670) = 1.5 \mu W / (cm^2 \cdot sr \cdot nm)$ 程度適当であることがわかった。

雲近傍のマスク処理（平成7年度）としては、雲を判別する閾値よりも低めの閾値を設けて単純閾値法でフラグを立てる方法（A案）と局所領域の雲の被服率によってフラグを立てる方法（B案）について比較、検討を行った。処理時間においては、アルゴリズムを最適化すればB案はA案とそれほど大差のない計算時間で計算が可能であることがわかった。また、処理結果についてはB案はエアロソルの濃度に依存せず雲近傍にのみフラグを立てることができるなど、フラグを立てる方法としてはA案よりも優れているという結果が得られた。今後は、適切な窓の大きさ、雲の被服率、雲の輝度、雲からの距離などを考慮に入れた検討をすれば、より正確な雲近傍のフラグが立てられると考えられる。

画像の両端のピクセルの異常値については、CZCSのスキャン両端では大気補正の信頼性が低く、異常値が生じる。このような画像端のマスクの必要性やマスクの適正サイズについて検討した。その結果、チルトが最大の20度のとき、画像右端の異常とみなされたピクセルは最大で160ピクセルであった。一方、画像の左端ではほとんどその影響が見られなかった。よって、画像端のマスクは、右端で必要であるが左端には必要ではないことがわかった。また、そのマスクの適正な範囲は、チルト角に伴って変化し、最大で160ピクセルが適当であることがわかった。

大気補正処理の高精度化については、1画素毎の大気圧およびオゾンの考慮（平成6年度）を検討した。Andre and Morel (1988) は、オゾン濃度と大気圧が変動した場合の大気補正処理の誤差による植物プランクトン色素濃度の推定誤差について検討している。オゾンは、可視域に吸収帯を持ち波長によってその吸収度が異なるため、オゾンの増減によって波長毎の透過率が変わる。植物プランクトン色素濃度は、大気補正後の海水射出放射輝度の波長間の比を用いて推定しているため、オゾンの濃度が影響する。一方、大気圧は気体分子の量の多少を意味し、気体分子からの散乱光輝度と大気中の透過率に影響を与えると述べている。従来の処理では、オゾン量については各シーンの代表値を、大気圧については一定値（1013hPa）を用い、各シーンの全画素に適用していた。そこで、黄砂性エアロソルに対応した大気補正プログラムに、オゾンと気圧データから各画素毎のオゾンと気体分子の光学的厚さを求め、透過率や分子散乱光計算に考慮するルーティンを組み込んだ。オゾンのデータは、Nimbus-7のTOMS (Total Ozone Mapping System) データを、気圧データについてはECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) データを用い、各画素毎に適正なオゾン量・気圧を用いて大気補正を行うシステムを開発した。その結果、従来の処理結果と比べ、植物プランクトン色素濃度で5~10%の違いが見られることが確認された。また、日本近海の船舶観測データとの比較でも、従来の処理に比べ

て実測データにより近い色素濃度値が得られることがわかった。

図9は、3年前に作成したものと今回の植物プランクトン色素濃度の複合画像を示している。3年前のものとは大きく異なる部分は、有効画素数であろう。これらの画像は1980年5月のCZCSシーン132シーンを処理した結果である。3年前は1シーン毎に目視で取捨選択を行っていたため、一部でもノイズがある場合は複合画像作成の際に除外していた。両者を比較してわかるように海域をカバーしている部分は、今回のものは3年前のものとは比べてかなり増えていることがわかる。見た目にはわからないが、カバーしている面積だけではなく1画素内の平均に使用したデータ数も3年前に比べて4倍から10倍に増加している。

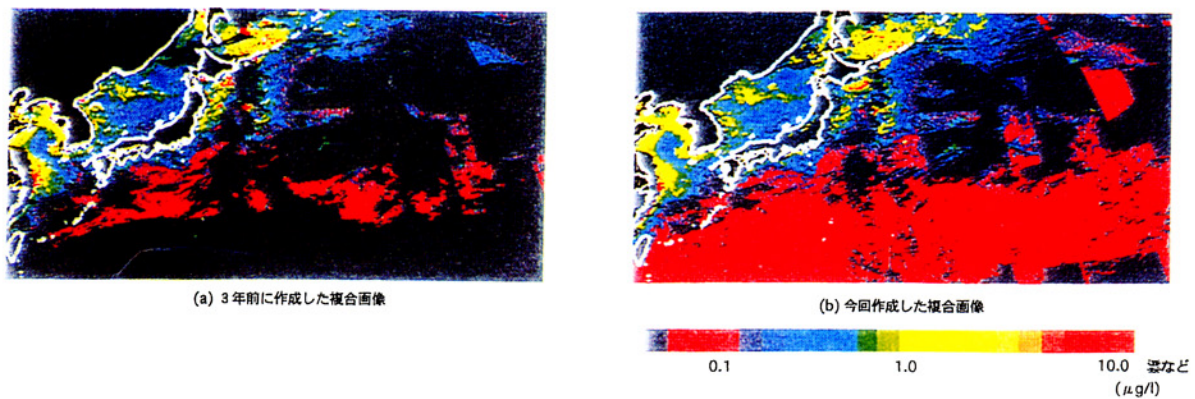


図9 1980年5月の北西太平洋の植物プランクトン色素濃度の複合画像。3年前(a)と今回(b)とを比較すると、有効画素数の増加により今回(b)の方がより広い海域をカバーしていることがわかる。

図10は、今回新たに作成された1980年1月から12月までの各月の植物プランクトン色素濃度の複合画像を示している。1980年は日本近海のCZCSデータが最も多かった年で年間を通した全シーン数は約1200シーンである。これだけのシーンを処理してもなお北西太平洋全域をカバーするにいたっていない。これはCZCSが試験衛星であり常時観測が行われなかったこともその一因だが、それだけではなく衛星データはあっても1月の日本近海のように雲に覆われていたために取得頻度が少なかったこともあげられる。

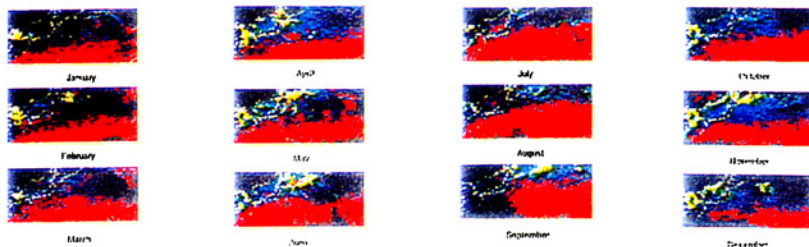


図11 1980年の各月の植物プランクトン色素濃度の複合画像

処理時間について研究スタート当初と比較すると、クオリティチェックに必要な時間を除いた1シーンあたりの平均処理時間は、3年前が60分に対して今回は12分と約5分の1に短縮された。クオリティチェックの時間を含めた処理時間は、いちいち目視によって1シーン毎にチェックしていた3年前には、約3カ月を要した。この値は評価者の処理時間に依存し少々曖昧な値であるが、我々の処理に要した実時間である。また3年前は原データを3間引きして計算時間を減らし複合画像を作成したが、それでもCZCSの8年間分の全データの処理にこれだけの時間を要している。一方、今回のデータ処理では、原データをそのまま間引きせずに処理を行ったが、全データを処理するために必要な時間は実時間で約1年半であった。これには、計算処理時間以外にデータの圧縮・テープへの保存、データディスクの交換などの作業の時間をを含んでいる。1シーン平均の処理時間は約11分なので計算処理のみの時間では約1カ月である。計算処理量を実時間で比較すると、データ量は間引き3から間引きなしへと変化した、つまり9倍のデータを処理したことになるが、全シーンの処理時間は3カ月から1カ月半と2分の1に短縮された。よって、システムを高速化した結果、全体のデータ量あたりの処理時間は18分の1と大きく短縮したことになる。

d) SeaWiFSの新波長による生物環境パラメータ算出手法

日本周辺のCZCSによる9シーンについて、本研究で提案した空間相関解析（平成5年度報告書参照）を用いてエアロゾルパラメータ ϵ を推定した。その結果、 $\epsilon(\lambda, 670)$ は平均的には1に近く、また、波長 λ が短くなるほど $\epsilon(\lambda, 670)$ は小さくなる傾向にあること、波長依存性が比較的小さいことなどが知られた。また、日本海と太平洋とでは異なる傾向となること、また、日本海では波長が短くなるにしたがい $\epsilon(\lambda, 670)$ は大となる傾向となっていることが知られた。このことは、日本海と太平洋とでは異なる大気エアロゾルモデルを用いて大気効果補正する必要があることを示している。

レーザーパーティクルカウンタを用いて地上における大気エアロゾル粒子径分布を測定した。パーティクルカウンタによる測定は、比較のために、はじめ千葉市でおこない、続いて、新潟市（日本海区水産研究所内）でおこなった。新潟市を選んだ理由は黄砂性エアロゾルの光学的特性を調べるのに適していることにある。

測定結果から、粒子数は時間、日によって大きく変動していることが知られた。0.3ミクロンの粒子の最大個数は、千葉市の場合大気量0.01立方フィート（283ml）あたり90,000個以上となることがあり、新潟市の場合やや低く約70,000個となっている。最小値は千葉市で7,000個、新潟市で1,500個前後であり、新潟市の方が少ない。0.3ミクロン粒子の平均粒子数は千葉市で約45,000個であるのに対し、新潟市では千葉市の約半数の22,800個であった。

0.3ミクロンから5ミクロンの範囲内の粒径分布測定結果は、比較的Jungeモデルの分布形（Power Law分布）に近いことが知られた。また、1日内の時間による粒子数、また、粒径分布には系統的な変動パターンは見られず、一日内の変動の時間依存性は小さいことが知られた。強いていえば18時ごろ最大となり、0～6時ごろ最小となり、午後に粒子数が増加する傾向がある。これは人の生活活動や生産活動に起因するものと思われる。Power値は千葉市で-2.5～-4.5、新潟市で-2.0～-4.0の範囲であった。

以上の結果は、オングストローム指数則を用いたGordonらによるCZCS大気効果補正アルゴリズムを適用できる条件下にあることを示している。この測定は10月から1月までのもので、黄砂

の影響が無いときの基準となるものである。黄砂性エアロゾルの多くなる4月から8月にかけてであり、現在も継続的に観測を行なっている。

SeaWiFS および ADEOS-OCTS データによる DOM推定のための生物-光学的アルゴリズムについて検討した。海水中にn種の物質が混在するとき、各物質の分光吸収、後方散乱特性、または消散係数、および、各物質の量をもとに海水の分光・放射照度反射率をきめることができる。また、各色素の最大吸収波長、また、後方散乱の大きい波長を選択、組み合わせて、それらの反射率比を考えることにより、反射率比から色素量を逆に推定するモデルを考えることができるようになる。DOMの推定には、 $R(412) / R(555)$ のような単純な2バンド比だけでは十分な推定精度が期待できない。また、クロロフィル色素量の推定に対しては、CZCSタイプの443nmと555nmとの比よりも、490nmと555nmとの比の方がクロロフィル量の推定精度が高くなる。DOMの推定のためには、簡単な2バンド比では不十分で、多重バンドモデルが必要となる。また、412nmと555nmとの組み合わせよりも412nmと433nmとの組み合わせを用いる方が推定精度が高くなる。

クロロフィル色素推定に対しては、CZCSで用いられている443nmと555nmとの比よりも490nmと555nmとの比の方が推定精度が高くなる。DOMについては簡単な2バンド比では不十分で、多重バンドモデルが必要となる。また、412nmと555nmとの組み合わせよりも412nmと433nmとの組み合わせを用いる方がDOMへの感度が高く、また、クロロフィル色素の効果を消去するために、あわせて、443nmと555nmとの比演算を加えた推定モデルが考えられ、そのようなモデルがもっとも推定精度が高くなると考えられ、ADEOS-OCTSで検証する必要がある。

代替校正を行ったり、大気効果補正や植物プランクトン量推定値が適正なものであるかどうかのアルゴリズムのチェックをしたりするためには、校正や検証に適した海域を選定しておくことが便利である。検証をするために用いる海域モデルの条件として、(1) クラウドカバーが小さいこと、そして、(2) 時系列変動が小さく、安定 (< 5%) である、(3) 分光的な変化が小さい、(4) 空間的な一様性がよい (< 10%)、(5) 方向特性が小さい (< 10%)、(6) 十分な大きさ (面積) をもっている (> 5 * IF0V)、(7) プランクトン色素濃度の多少、大気効果の多少などの季節変化が典型的な海域であること、などがあげられる。

CZCSによって得られた月別(1月~12月)のクロロフィル色素濃度画像を重ね、12チャンネル画像として、クラスター解析により、植物プランクトン色素濃度変パターンを抽出し、また、海域分割を行った。クラスター解析には ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques A) 法を用いた。なお、クラスターリングの条件は「分類クラスター数(海域エリア数) = 8、収束条件 = 98%」とした。

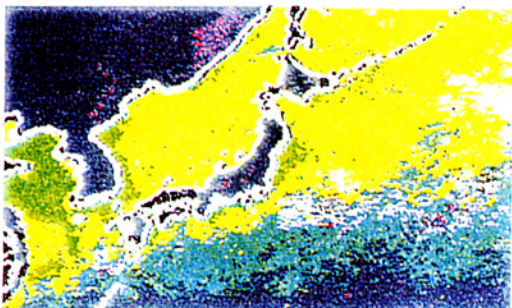


図10 植物プランクトン色素濃度の月変動パターンによる海域分割図

図11は植物プランクトン色素濃度平均値の月別変化のクラスタリング画像である。青色で示される海域は年間を通して色素濃度が低く、クリアなエリア1の海域である。また、濃い緑は6月から9月にかけて（夏）色素濃度が低いエリア3に対応する海域、および、パイングリーンは5月から9月の夏と、1,2月の冬に色素濃度が低くなるエリア4である。緑色はエリア7であり、春3月から5月と、秋10月から11月に色素濃度が他の海域よりも大きくなる海域である。黄緑色はエリア5で、エリア7と類似の変化を示す海域で、秋のブルーミングにより10月から11月に色素濃度が他よりも大きくなる。黄色のエリア6は月別変化がもっとも大きい海域で、6月に色素量が最大となり、12月1月にはクリア海域と同程度に低くなる。

図12は植物プランクトン色素濃度平均値の月別変化パターンである。エリア1（図11の青色海域）は年間を通して色素濃度が低く、クリアな海域であることが知られる。また、エリア3（図12の濃い緑色の海域）は6月から9月にかけて（夏）色素濃度が低く、エリア4（図11のパイングリーン海域）は5月から9月の夏と、1,2月の冬に色素濃度が低くなる。エリア7（図11の緑色海域）は春3月から5月と、秋の10月から11月に色素濃度が他よりも大きくなる海域パターンクラスである。エリア5（黄緑色）もエリア7（緑色）と類似の変化パターンであり、10月から11月に色素濃度が大きくなるのは秋のブルーミングによる。エリア6（黄色）は月別変化がもっとも大きい海域パターンクラスで、6月に色素量が最大となり、12月、1月には、クリア海域と同程度に低くなることが知られる。

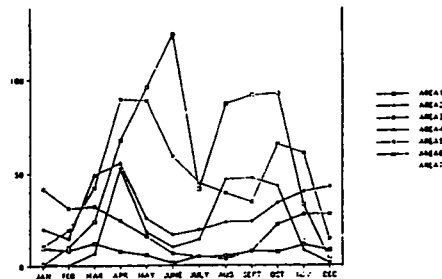


図12 植物プランクトン色素濃度の月変動クラスターの特性

色素濃度の月変化だけでなく、エアロゾル・パスラジアンズを含めたクラスタ解析により、アルゴリズム検証に適した日本周辺海域について検討した。その結果は図13のようになり、以下のような特徴をもつ八つの海域が抽出された。

- (1) エリア<A>：年間を通してエアロゾル・パスラジアンズ、La (670)、の変動が小さい海域（特にA'）。この海域は、11月～3月にはパスラジアンズ量が小さくなり大気がクリアと鳴る海域である。また、この海域のプランクトン色素濃度の月変動が大きく、6月に最大となり、逆に12月～1月には小さくなる。
- (2) エリア：年間を通じてエアロゾル・パスラジアンズ、La (670)、の量の大きい海域。10月～11月にはブルーミングによりプランクトン色素量が増える海域である。また、
- (3) エリア<C>：La (670) が大きい、La (670) の変動が小さく安定な海域。
エリアと類似であり、春3～5月と秋10～11月にはプランクトン色素量が多くなる。しかし、エリア<C>はエリア<D>に属し、正規化海面射出光放射輝度、Lwn (550) が大きい。
- (4) エリア<D>：正規化海面射出光放射輝度、Lwn (550)、が年間を通して大きい海域。

(5) エリア<E>：年間を通じてエアロゾル・パスラジアンズ、La (670)、の量の大きい海域。

日本海にLa(670)が大きい、La (670) の変動が小さく安定なエリアがある。

(6) エリア<F>：パスラジアンズ、La (670)、の変動 (SD) が小さい海域。

夏6月から9月にかけてパスラジアンズ量が少なくクリアな大気となる海域である。プランクトン色素量も少ない。

(7) エリア<G>：<F>と同様に、パスラジアンズ、La (670)、の変動 (SD) が小さい海域。

4月～9月にかけてパスラジアンズ量が少なくクリアな大気となる海域である。プランクトン色素量も少ない。

(8) 東経160度から175度の間は雲が多く、ターゲットを選択するのに適さない海域である。

以上に示した海域モデルは十分の大きさ (面積) をもち、POLDERのような低空間分解能のセンサの検証、また、OCTS、SeaWiFS、POLDERなどのクロスキャリブレーションにも役立てられるものである。

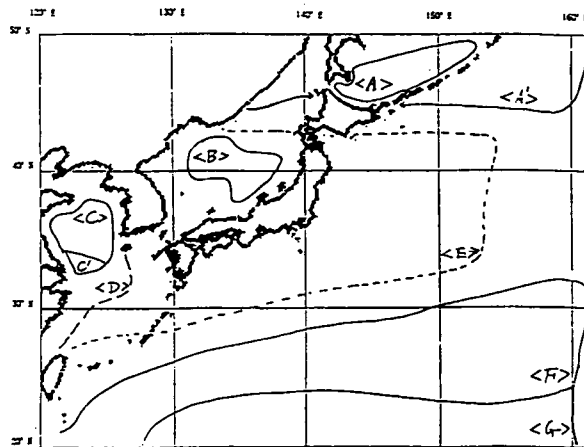


図 1 3 クラスタ解析により得られた検証海域モデル

5. 引用文献

Andre and Morel (1989) : Simulated effects of barometric pressure and ozone content upon the estimate of marine phytoplankton from space, Journal of Geophysical Research, Vol.94, No.C1, pp.1029-1037.

有賀祐勝 (1965) : 水塊植物群落の物質生産 II, 共立出版

Feldman G.C., N.Kuring, C.Ng, W.Esaias, C.R.McClain, J.Elrod, N.Maynard, D.Endresm, R. Evans, J.Brown, S.Walsh, M.Carle and G.Podesta (1989) : Ocean color: Availability of the global data set, EOS Trans. American Geophysical Union, 70, pp.634-640.

Gordon H.R., O.B.Brown, R.H.Evans, J.W.Brown, R.C.Smith, K.S.Baker and D.K.Clark (1993) : A Semianalytic radiance model of ocean color, Journal of Geophysical Research, Vol. 93, No.D9, pp.10909-10924.

福島、虎谷、中島 (1993) : Nimbus-7/CZCSデータによる北西太平洋の海色複合画像, 写真測量とリモートセンシング, Vol.32, No.3, pp.34-38.

Hovis, W.A. et al. (1980) : Coastal Zone Color Scanner, Science, 210(3)

川合英夫 (1972) : 黒潮と親潮の海況学. 海洋物理 II (海洋科学基礎講座, 2, 増沢譲太郎編),

- 129-321, 東海大学出版会.
- 松村皐月・塩本明弘 (1993) : 基礎生産力関数 Φ の鉛直分布 (II), 遠洋水産研究所研究報告, 30, 227-276
- 長田宏・平川和正・平井光行・井口直樹・西濱士郎・山田東也 (1996) : 日本海中央部におけるクロロフィル分布とその変動機構に関する研究. 環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書, 環境庁, 86-96.
- 長田宏・小川嘉彦・平井光行・平川和正 (1996) : 日本周辺海域における透明度の地理的分布と季節変動. 日水研報告, 46, 1-24.
- 西浜雄二 (1982) : 噴火湾口鹿部沖におけるクロロイル量の季節変化に関する10年間の観測, 1973-1982. 水産海洋研究会報, 41, 62-64.
- 大谷清隆 (1971) : 噴火湾の海況変動の研究II. 噴火湾に流入・滞留する水の特性, 北大水産研究報, 22, 58-66
- 荻島隆 (1991) : 北海道南東海域におけるマイワシ餌料としてのクロロフィル a 分布. 北水研報告, 55, 173-184.
- 奥村晴彦 (1986) : パソコンによるデータ解析入門, 技術評論社, 東京
- Platt, T. and S. Sathyendranath (1988) : Oceanic Primary Production, Estimation by Remote Sensing at Local and Regional Scales, Science, 241, 1613-1620
- 水産電子協会 (1995) : ADEOS DTL受信装置の検証実験予備調査. 平成6年度宇宙開発事業団業務委託成果報告書, pp92.
- Takagi, M., H. Fukushima, I. Asanuma and J. Ishizaka (1993) : Northwestern Pacific Coastal Zone Color Scanner Monthly Composite, a CD-ROM publication.
- 谷岡克己 (1962) : 日本海の海況II, 日本海にみられる冷水域・暖水域及び高かん水について. 海と空, 38, 115-128.

6. 研究発表等の状況

原著論文

- 福島、虎谷、中島 (1993) : Nimbus-7/CZCSデータによる北西太平洋の海色複合画像, 写真測量とリモートセンシング, Vol.32, No.3, pp.34-38.
- 松村皐月・塩本明弘 (1993) : 基礎生産力関数 Φ の鉛直分布 (II), 遠洋水産研究所研究報告, 30, 227-276
- 長田宏 (1994) : 日本海におけるクロロフィルの変動特性. 水産海洋研究, 58, 119-122.
- 長田宏 (1994) : 日本海における透明度の変動とその季節変動 (予報). 日水研報告, 44, 31-38.
- 長田宏 (1994) : 日本海南部におけるクロロフィル a 量と透明度の関係. 日水研報告, 44, 39-47.
- 長田宏 (1994) : 1986年冬・春季の佐渡海峡における植物プランクトン主要出現群の経日変化. 日水研報告, 44, 139-142.
- 長田宏・小川嘉彦・平井光行・平川和正 (1996) : 日本周辺海域における透明度の地理的分布と季節変動. 日水研報告, 46, 1-24.
- 長田宏 (1996) : 日本周辺海域におけるクロロフィル a 量と透明度との関係. 日水研報告, 46,

25-43.

Takagi, M., H. Fukushima, I. Asanuma and J. Ishizaka (1993) : Northwestern Pacific Coastal Zone Color Scanner Monthly Composite, a CD-ROM publication.

学会発表

西濱士郎 (1995) : 日本海中央部における浮遊性ヤムシ類 *Sagitta elegans* の成長. 日本生態学会秋季大会.

長田宏 (1995) : 日本海における透明度の長期変動. 日本海洋学会秋季大会.

塩本明弘 (1995) : 1993-1995年親潮外洋域におけるクロロフィル a の観測結果. 日本海洋学会秋季大会.

西濱士郎 (1996) : 肉食性動物-プランクトンの日周移動. 日本生態学会春季大会.